

## 論文の内容の要旨

氏名：榊原 直樹

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：フライアッシュを用いた道路橋場所打ちコンクリート床版の現場実装に関する研究

戦後、我が国は諸外国にも例を見ない急速な経済成長を 1960 年代に遂げ、社会資本の整備として道路インフラの整備が急速に進み、1970 年代には床版コンクリートの抜け落ちといった比較的交通量の多い大型車の繰り返し荷重に起因した疲労による損傷問題が多く発生した。1991 年には、スタッドタイヤの使用が禁止され、それ以降、冬期のスリップ事故防止のため、塩化ナトリウムを主成分とした凍結防止剤の散布量が急激に増加していった。これは、高度経済成長期に建設された道路橋コンクリート床版にとって、想定外の作用であった。凍結防止剤の本格散布から未だ 20 数年程度しかたっていないものの、近年、凍結防止剤によりコンクリート構造物の塩害、塩分環境下の凍害やアルカリシリカ反応（ASR）による複合劣化の事例が報告されるようになった。しかし、まだ多くのコンクリート床版は潜伏期にあり、今後その劣化が顕在化するものと予想される。凍結防止剤が散布され、それがコンクリート床版内部に浸透すると、塩害による鋼材腐食、凍害によるスケーリング、ASR が促進され、さらに交通荷重の繰り返しによる疲労との複合劣化となることで、これまでに交通荷重の少ない路線ではあまり見られなかったコンクリート床版においても、塩害、凍害、塩分環境下の ASR による複合劣化による損傷事例が報告されるようになってきた。また、凍結防止剤は沖縄等一部の温暖な地域を除き、ほぼ全国で散布されている。そのため、飛来塩分の影響を受ける構造物のように、その分布が沿岸地域に限定されるものではなく、寒冷地全域に広く分布することから、対象橋梁数が膨大になることが指摘されている。今後、その維持管理に膨大な費用を投じることが予想されることから、社会問題になりつつある。そこで、本研究では、この種の複合劣化に対し、複合防御網の考え方を導入し、コンクリート橋梁の施工者として高耐久床版の実現を目的とした。材料・配合設計・施工上の観点から、具体的な方法論を構築するとともに、本手法を現場に適用することで、高耐久床版として必要な性能を有する道路橋場所打ちコンクリート床版を実装することとした。

凍結防止剤散布下におけるコンクリート床版の耐久性確保として、塩分浸透抑制効果と ASR 抑制効果のあるフライアッシュ（FA）を用いることがコンクリート材料面から有用であることが既往の研究より明らかになっている。さらに、東日本大震災による原子力発電所の事故以降、石炭火力発電の依存度の高まりから、大量に発生する産業廃棄物としての FA の有効利用が課題となっている背景がある。しかし、FA をコンクリートに添加することでの施工面の問題は、スランプや空気量の経時変化に対する保持性に問題があることが知られている。特に、寒冷地においては、空気量の損失については、耐凍害性の面から非常に問題となることが既往の研究から明らかになっている。また、スランプの損失では打込み、打重ねや仕上げ不良に直結する。そのため、材料面で塩分浸透抵抗性と ASR 抑制効果があり、施工面では施工の過程において施工性が良く耐凍害性にも優れた FA コンクリートの床版への適用が耐久性確保には重要である。そこで、筆者は、FA を用いた道路橋場所打ちコンクリート床版の現場実装に関する研究を行った。

本研究の独創性と有用性は、空気量のばらつきや硬化速度の制御が難しいため、床版での使用実績のなかった FA を耐久性の向上するコンクリート混和材として利用し、現場施工での品質確保の実現を目的とし、高耐久場所打ちコンクリート床版の実装が可能であることを明らかにした点にある。前例のないコンクリートでの施工で、各施工段階での課題に対し、現場試験施工に基づき確認検証し、対応策を講ずることで管理値の設定や施工方法を考案することで現場実装を達成した。

本論文は、「フライアッシュを用いた道路橋場所打ちコンクリート床版の現場実装に関する研究」と題し、全 6 章から構成されている。

本論文を要約すると、以下の通りである。

第1章は「序論」であり、本研究の背景となる、道路橋の老朽化に加え、凍結防止剤散布下における複合劣化の現況と取り巻く社会情勢から、新設道路橋の耐久性確保の重要性を示した。そこで、本研究では、石炭火力発電所からのFAを将来的な資源として、耐久性の向上を期待できるコンクリート混和材として有効活用することで、高耐久床版の実現を目的とすることとした。

第2章の「道路橋コンクリート床版の耐久性確保に関する既往の研究」では、まず、凍結防止剤散布下におけるコンクリート構造物のうち、コンクリート床版を含む橋梁上部工の損傷事例を整理した。また、各種劣化のメカニズムとこれまでの対応を示すとともに、FAを用いた各種劣化への対策効果や課題に関する既往の研究についてまとめた。さらに、FAをコンクリートに添加することでの、高い塩分浸透抑制効果と高いASR抑制効果に対し、耐凍害性に影響する空気量の損失や品質確保の面で問題となるスランプの変動といった問題への対応の重要性を示した。そこで、コンクリートにFAを添加することで耐久性の向上性を期待し、現場施工での品質確保の実現を目的とする本研究の位置づけを明確にした。

第3章の「フライアッシュを用いた道路橋場所打ち鉄筋コンクリート床版の現場実装」では、実装の使命として複合防網網の考え方を導入し、JIS規定Ⅱ種のFAと普通ポルトランドセメントを組み合わせた前例のないコンクリートにより、国土交通省東北地方整備局で整備された復興支援道路の鉄筋コンクリート床版（RC床版）の施工を行った。現場実装に当たり、生コン工場のJIS配合をベースに、既往の研究成果から結合材の20%質量のFAを外割添加した配合で、試し練りを行った。試し練りにより基本性状を確認し、FAコンクリートの配合を決定した。確認の結果、FAコンクリートの再現性やブリーディング量が少ないことが確認された。安定供給が可能かを実機試験で検証した後、実機練り試験施工において、実施工での懸念事項を模擬床版にて確認検証することで、対応策を講じ、実施工の施工計画に反映し現場実装した。その結果、我が国で初めてFAコンクリートを用いた場所打ちRC床版の施工に寒中施工下で成功した。本施工後の3箇月間の養生終了後に、各種試験にて初期状態の確認を行い、本床版が十分な耐久性を示すことを明らかにし、施工管理の妥当性と検討手順の有効性を検証した。特に、コンクリート標準示方書で示される締固め加振時間について、当該配合で最適な振動時間（8秒）を提唱し、同種の後発の床版工事で採用されていることが成果である。

第4章は「Ⅳ種管理されるフライアッシュを用いたコンクリートの品質と性能評価」である。ここでは、福島県浜通り地方において排出されるJIS規定Ⅳ種で管理された対象とするFAの地産地消を目指し、コンクリート用混和材としての適用性検証を目的に室内試験を実施した。最初に、モルタル試験の実施で、FAの外割添加によるブリーディングの抑制、凝結時間の促進や強度増進を確認した。また、FAの比表面積の小さい粗いものほどフローロスしにくい傾向であることを確認した。コンクリートの性能評価に関し具体的には、コンクリート用混和材としてセメントの外割20%質量添加を前提に粉体量が増える分、細骨材率を低減するという基本方針で行った。異なる特性のⅣ種管理されたFAをコンクリートの混和材として利用するにあたり、フレッシュ性状と硬化性状を評価したところ、ともに比較的小さなばらつきの範囲に収まることが明らかとなり、混和剤の添加量を微調整することで要求性能を満足する配合を設計できる可能性が示唆された。加えて、場所打ちプレストレストコンクリート床版（PC床版）用の早強ポルトランドセメントとⅣ種管理されるFAを併用した早強FAコンクリートの現場実装するため、配合検討と各種耐久性評価を行った。その結果、Ⅳ種管理されるFAにおいても塩分浸透抵抗性およびASR抵抗性が顕著に改善されるコンクリートを製造可能であるとの見通しを得た。

第5章は「早強ポルトランドセメントとフライアッシュを併用した道路橋場所打ちプレストレストコンクリート床版の現場実装」である。ここでは、第4章での結果を受けJIS規定Ⅳ種で管理されたFAと早強ポルトランドセメントを組み合わせ、常磐道暫定2車線区間の機能強化事業で整備された場所打ちPC床版の実装を行った。低水結合材比の早強FAコンクリートの実大模擬床版によりポンプ圧送し施工性確認試験を行った。結果より、早強FAコンクリートは所定の強度特性や耐久性を有することを確認したものの、第3章で示したRC床版以上に、空気量のロスが著しく、粘性が高くワーカビリティの改善が必要であった。そのため、配合の見直しや工場出荷時のスランプと空気量を上げ越しする管理指標を提案し

た。工場出荷時の空気量とスランプを上げ越しすることで、現場到着から施工の過程に要する時間内に、良好なフレッシュ性状を保持することが可能となり我が国で初めて FA コンクリートを用いた場所打ち PC 床版の施工を暑中施工下で成功した。施工後に調査した表層品質も良好な結果を得られたことから、管理指標と配合調整によりⅣ種管理される FA を用いた早強 FA コンクリートが実施工に適用できることを明らかにした。

第 6 章の「結論」では、研究で明らかとなった知見を各章ごとにまとめるとともに、Ⅳ種管理される FA を用いた FA コンクリートの標準化に向けた FA 品質の制限に関する提案、施工手順や合理的な配合設計手法の道筋について今後の課題と展望として述べた。